

GAMMA 10/PDX 開放端部における静電プローブを用いた高イオン温度プラズマ計測

野尻訓平、坂本瑞樹、江角直道、東郷訓^a、飯島貴朗、ジャンソウオン、
寺門明紘、木下洋輔、原利樹、小波蔵純子、吉川正志、中嶋洋輔
筑波大学プラズマ研究センター、^aITER 機構

核融合炉のダイバータ板に集中する熱・粒子負荷を低減する方法として非接触ダイバータ化が有望視されており、非接触プラズマ形成のメカニズムを解明することが求められている。非接触プラズマ形成過程においてイオン温度(T_i)は重要なパラメータであるが、非接触化過程のダイバータのように高ガス圧環境で低温高密度の水素同位体プラズマの T_i を計測することは難しく、 T_i の空間分布や時間変化を得るために簡便な T_i 計測手法の開発が必要となる。本研究では静電プローブ(LP)で計測されるイオン飽和電流にイオンの磁力線方向の比熱比(γ)と温度($T_{i||}$)の積($\gamma T_{i||}$)が寄与することに着眼し、新たな計測手法として簡便な計測器である LP を用いた $T_{i||}$ 評価法の開発を検討しており、ここで課題となる γ と $T_{i||}$ の関係を明らかにすることを目的としている。 γ の値は典型的な流体モデルではイオンの衝突度に依存して変化するが、近年の粒子シミュレーション研究では無衝突状態でもイオンの温度とエネルギー分布関数形状の変化によって γ が変化するという結果[1]があり、 γ と $T_{i||}$ の関係を明らかにすることが重要となる。また、イオン音速(C_s)は $C_s = \{(kT_e + \gamma kT_{i||})/m_i\}^{1/2}$ と表され、ダイバータ板前面で流速が C_s 程度の時のイオンの磁力線方向運動による熱流束(磁力線方向成分の対流、 $P_{i||}$)は $P_{i||} = (3/2 nkT_{i||} + 1/2 m_i n C_s^2) C_s$ と表されるように、 γ と $T_{i||}$ は C_s と $P_{i||}$ にも寄与する。トカマクの SOL/ダイバータでは T_i が T_e 以上となる傾向が実測されている[2,3]ことや、補助加熱によりイオンエネルギー分布に高速成分が生じると考えられていること、ELM 時の高温・無衝突化[4]などにより SOL/ダイバータでも高温の無衝突プラズマとなる場合があると予測されていることから、 C_s と $P_{i||}$ の特性を把握するためにも γ と $T_{i||}$ の関係は重要となる。

本研究ではタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX の開放端部の $T_{i||}$ を幅広く変化させ、LP で計測されるプラズマの γ と $T_{i||}$ の関係を取得する実験を行い、以下の結果を得た。ICRF 加熱やガスパフを用いて $T_{i||}$ を変化させ、LP で評価した $\gamma T_{i||}$ ($\gamma T_{i||,LP}$) の特性をエネルギー分析器(IEA)で計測した $T_{i||}$ ($T_{i||,IEA}$) と比較した。閉じ込め領域(セントラル部)プラズマの ICRF 加熱を行うと、開放端部の $T_{i||,IEA}$ は上昇し、 $\gamma T_{i||,LP}$ は低下した。この ICRF 加熱に加えてセントラル部にて追加ガスパフを行うと、 $T_{i||,IEA}$ 、 $\gamma T_{i||,LP}$ 共に低下した。以上の $\gamma T_{i||,LP}$ 変化の要因を γ の変化という観点から考察するために、 $\gamma T_{i||,LP}$ と $T_{i||,IEA}$ の比から γ を見積もった結果、 γ は ICRF 加熱によって低下し、ガスパフを行うと上昇した。 γ 変化の要因を検証するために、計測データを基に開放端部におけるイオン-イオンやイオン-中性粒子間の衝突度と、イオンエネルギー分布関数に関する考察を行った。その結果、無衝突の状態でもイオンエネルギー分布関数に高温成分が生じて $T_{i||}$ が上昇することにより γ が低下するという可能性を実験的に示した[5]。また、LP データから C_s を評価し、 $T_{i||,IEA}$ と合わせて $P_{i||}$ の評価も行った。 $T_{i||}$ と T_e が上昇しても γ が低下することにより C_s が低下する場合があることと、 $T_{i||}$ と密度の上昇により $P_{i||}$ は上昇するものの、 γ および C_s が低下しているため、 γ が一定の場合よりも $P_{i||}$ 上昇量が小さい場合があることを示唆した。

- [1] B. Lin *et al.*, Phys. Plasmas **23** (2016) 083508.
- [2] M. Koc̄an *et al.*, J. Nucl. Mater. **415** (2011) S1133.
- [3] S. Elmore *et al.*, J. Nucl. Mater. **438** (2013) S1212.
- [4] A. Loarte *et al.*, Nucl. Fusion **54** (2014) 033007.
- [5] K. Nojiri *et al.*, to be published in Plasma Fusion Res. (2019).